·论著·

有氧运动对不同血糖水平男性人群动脉僵硬度的即时影响

何荣[1,2]，张丽[1]，李鹏[1]，张晓玲[1]，张国[1]，臧懿然[2]，吴寿岭[3]，孙丽霞[1*]

【摘要】 **背景** 以往有氧运动获益的研究主要关注的是有氧运动对长期心血管健康及结局的影响，即规律有氧运动可以改善动脉僵硬度，而有研究指出高血糖是增加动脉僵硬度的因素，因此推测高血糖可能削弱了有氧运动改善动脉硬化的作用。为了验证这一假设，本研究对有氧运动后人群立即进行动脉僵硬度检测以反映即时影响，利用开滦研究数据，分析有氧运动对不同血糖水平人群动脉僵硬度的即时影响。**目的** 探究有氧运动对不同血糖水平人群动脉僵硬度的即时影响。**方法** 本研究以既参加开滦研究2018—2020年第6次随访体检又于开滦集团旗下四家企业完成功率车二级负荷试验前、后臂踝脉搏波传导速度（baPWV）测量者为研究对象。对研究对象开展流行病学调查，包括一般情况（年龄、高血压、高脂血症、降压药史等）、人体测量学指标〔收缩压（SBP）、舒张压（DBP）等〕和生化检测指标（空腹血糖等），根据空腹血糖水平将研究对象按照四分位分组：Q1组（n=220）：<5.00 mmol/L、Q2组（n=240）：5.00~<5.40 mmol/L、Q3组（n=230）：5.40~<5.81 mmol/L、Q4组（n=234）：≥5.81 mmol/L。以功率车二级负荷试验作为有氧运动的形式，以baPWV水平作为反映四肢动脉僵硬度的指标，收集研究对象功率车二级负荷试验前、后baPWV相关资料〔SBP、DBP、平均动脉压（MAP）、心率（HR）和baPWV水平、代谢当量（MET）、最大摄氧量（VO_2max）等〕，试验前记作1，试验后记作2；并计算前、后两次测量结果的差值（记作△baPWV等）。比较Q1组、Q2组、Q3组、Q4组流行病学调查资料和baPWV相关资料的差异；采用广义线性回归模型评估不同血糖水平对功率车二级负荷试验前、后baPWV水平的影响。**结果** 符合纳入标准的研究对象924例，平均年龄为（36.93±7.72）岁。各组流行病学调查资料比较结果显示，四组的年龄、高脂血症、高血压、降压药史、收缩压、舒张压、空腹血糖、高敏C反应蛋白、三酰甘油、总胆固醇、高密度脂蛋白胆固醇、低密度脂蛋白胆固醇情况比较，差异具有统计学意义（P<0.01）；各组功率车二级负荷试验前、后的baPWV相关资料比较结果显示，Q1组、Q2组、Q3组HR2高于HR1（P<0.01）；Q1组、Q2组、Q3组、Q4组的baPWV2高于baPWV1（P<0.01）；四组间的SBP1、SBP2、DBP1、DBP2、MAP1、MAP2、baPWV1、baPWV2比较，差异具有统计学意义（P<0.01）；与baPWV1相比，不同血糖水平人群baPWV2平均下降36.0 cm/s。广义线性回归模型分析结果显示，在校正混杂因素后，与Q4组相比，Q1组的△baPWV水平降低〔b（95%CI）=-18.96（-36.96，-0.96），P=0.04〕。**结论** 有氧运动能即时改善动脉僵硬的程度，但高血糖减弱了有氧运动改善动脉僵硬度的作用，临床医生要针对不同人群设计不同的有氧运动方案，以改善动脉硬化延缓血管老化。

【关键词】 运动；糖尿病；血管硬化程度；有氧运动；血糖；动脉僵硬度；脉搏波传导速度；心血管疾病

【中图分类号】 R165 R587.1 【文献标识码】A DOI：10.12114/j.issn.1007-9572.2023.0029

【引用本文】 何荣，张丽，李鹏，等.有氧运动对不同血糖水平男性人群动脉僵硬度的即时影响［J］.中国全科医学，2023.［Epub ahead of print］.DOI：10.12114/j.issn.1007-9572.2023.0029.［www.chinagp.net］

HE R，ZHANG L，LI P，et al. Immediate effects of aerobic exercise on arterial stiffness in a male population with different blood glucose levels［J］. Chinese General Practice，2023.［Epub ahead of print］

Immediate Effects of Aerobic Exercise on Arterial Stiffness in a Male Population with Different Blood Glucose Levels

HE Rong[1,2]，*ZHANG Li*[1]，*LI Peng*[1]，*ZHANG Xiaoling*[1]，*ZHANG Guo*[1]，*ZANG Yiran*[2]，*WU Shouling*[3]，*SUN Lixia*[1*]

1.Department of Emergency，North China University of Science and Technology Affiliated Hospital，Tangshan 063000，China；

2.Graduate School of North China University of Science and Technology，Tangshan 063200，China；

3.Department of Cardiology，Kailuan General Hospital，Tangshan 063000，China

[*]Corresponding author：SUN Lixia，Professor；E-mail：13323151999@189.cn

【Abstract】 **Background** Previous studies on the benefits of aerobic exercise mainly focus on the impact of aerobic

1.063000 河北省唐山市，华北理工大学附属医院急诊科 2.063200 河北省唐山市，华北理工大学研究生学院 3.063000 河北省唐山市，开滦总医院心血管内科

[*]通信作者：孙丽霞，教授；E-mail：13323151999@189.cn

本文数字出版日期：2023-04-03

exercise on long-term cardiovascular health and outcomes，namely regular aerobic exercise can improve arterial stiffness，while some studies point out that high blood sugar increases arterial stiffness. Therefore，it is supposed that hyperglycaemia may weaken the effect of aerobic exercise on improving arterial stiffness. To verify this，we used the Kailuan study data to analyze the immediate effect of aerobic exercise on arterial stiffness in people with different blood glucose levels. **Objective** To investigate the immediate effect of aerobic exercise on arterial stiffness in people with different blood glucose levels. **Methods** This study selected individuals who had participated in the 6th follow-up physical examination of the Kailuan Study during 2018—2020 and had their brachial-ankle pulse wave conduction velocity（baPWV）measured before and after the secondary load test of the power vehicle bicycle in four subordinate enterprises of Kailuan Group. Epidemiological survey result were collected：general information（age，hypertension，hyperlipidemia，history of antihypertensive drugs，etc.），anthropometric indicators〔systolic blood pressure（SBP），diastolic blood pressure（DBP），etc.〕and biochemical indicators（fasting blood glucose，etc.）. baPWV measured in the secondary load test of the power vehicle bicycle（used as the aerobic exercise）was used as an indicator of upper and lower limb arterial stiffness. baPWV-related indicators〔SBP，DBP，mean arterial pressure（MAP），heart rate（HR），baPWV，metabolic equivalent（MET），maximal oxygen uptake（VO_2max），etc〕. before and after the test were expressed using a unified form，for example，pre- and post-test baPWV were recorded as baPWV 1 and baPWV 2，respectively，and its pre- and post-test difference was denoted as △ baPWV. The epidemiological survey result and BAPWV-related data were compared between fasting blood glucose（FBG）quartile groups〔Q1（n=220）：<5.00 mmol/L；Q2（n=240）：5.00-<5.40 mmol/L；Q3（n=230）：5.40-<5.81 mmol/L；Q4（n=234）：≥ 5.81 mmol/L〕. Generalized linear regression model was used to evaluate the association of FBG with pre- and post-test baPWV. **Results** A total of 924 eligible cases were enrolled，with an average age of（36.93 ± 7.72）years. FBG quartile groups had statistically significant differences in mean age，hyperlipidemia and hypertension，history of using antihypertensive drugs，mean SBP，DBP，FBG，high sensitivity C-reactive protein，triglyceride，total cholesterol，high-density lipoprotein cholesterol and low-density lipoprotein cholesterol（P<0.01）. HR2 was found to be statistically significant higher than HR1 in groups Q1，Q2 and Q3（P<0.01）. baPWV2 was found to be statistically significant higher than baPWV1 in Q1，Q2，Q3 and Q4 groups（P<0.01）. SBP1，DBP1，MAP1 and baPWV1 significantly differed across the groups，and so did SBP2，DBP2，MAP2 and baPWV2（P<0.01）. Compared with baPWV1，baPWV2 decreased by an average of 36.0 cm/s in people with different blood glucose levels. The generalized linear regression model showed that after adjusting for confounding factors，the △ baPWV level in group Q1 was lower than that in group Q4〔b（95%CI）=-18.96（-36.96，-0.96），P=0.04）〕. **Conclusion** Aerobic exercise can immediately improve the degree of arterial stiffness，but the effect can be weakened by high blood sugar. Clinicians should design aerobic exercise programs according to the personal features of populations to improve arteriosclerosis and delay vascular aging.

【Key words】 Exercise；Diabetes mellitus；Vascular stiffness；aerobic exercise；Fasting blood glucose；Pulse wave velocity；Arterial stiffness；Cardiovascular disease

有氧运动是预防和治疗慢性非传染性疾病的基石[1-4]。长期有规律的有氧运动不仅可以减轻体质量[5]，降低血糖[6]，改善脂代谢[7]，还可以预防动脉硬化，进而预防心脑血管疾病的发生[8]，即便在心脑血管疾病的二级预防中，有氧运动也有举足轻重的地位[9]。此外，各种指南也将有氧运动作为主要的健康生活推荐方式[1-4]。

动脉僵硬度是反映动脉弹性及功能的指标之一，臂踝脉搏波传导速度（brachial-ankle Pulse Wave Velocity，baPWV）由于其无创易操作且可靠性高常被用来评价动脉僵硬度[10]。以往有氧运动获益的研究主要关注的是有氧运动对长期心血管健康及结局的影响[11-15]，即便有对短期或即时影响的研究也是以关注有氧运动对血压影响的研究为主，仅有少数小样本的研究观察了有氧运动对动脉僵硬度的影响，结论也不一致。KOBAYASHI等[16]以11例健康男性青年人群为研究对象的研究发现有氧运动后即时动脉僵硬度明显改善，另一项研究以24例青年糖尿病人群为研究对象发现有氧运动后即时动脉僵硬度无明显改善[17]。有研究指出高血糖是增加动脉僵硬度的因素[18-21]，因而推测高血糖可能削弱了有氧运动改善动脉硬化的作用。为了验证这一假设，本研究利用开滦研究资料，并结合2020年第五次国民体质监测数据，以分析有氧运动对不同血糖水平人群动脉僵硬度的即时影响，期望于能为改善动脉硬化、延缓血管老化提供新的临床策略，并为临床设计不同人群的有氧运动方案提供科学指导。

1 对象与方法

1.1 研究对象 本研究以既往参加了开滦研究2018—2020年第六次随访体检且被抽取参加2020年第五次国民体质监测并于开滦集团旗下四家企业完成功率车二级

负荷试验前、后 baPWV 测量者为研究对象。开滦研究（ChiCTR-TNC-11001489）是一项基于功能社区人群心血管病危险因素的调查及干预研究，始自 2006 年 7 月，由开滦总医院以及开滦集团所属 10 家医院负责对开滦集团在职及退休人员进行健康体检，此后每 2 年进行一次随访。为系统掌握国民体质状况、增强国民体质的相关政策提供依据，2020 年国家体育总局在全国开展了第五次国民体质监测[22]，调查以行业为抽样单元，根据煤炭行业典型工种分布特点，随机抽取了开滦集团四个所属企业 1 200 名 20~49 岁男性职工作为样本人群，并于开滦集团旗下四家企业内进行体质水平检测。检测内容包括功率车二级负荷试验、坐位体前屈、心肺耐力测试、体脂率等，在原测量内容的基础上，本研究在功率车二级负荷试验前、后增加了 baPWV 测量。

1.2 纳入与排除标准 纳入标准：（1）参加开滦集团 2018—2020 年第六次随访体检且被抽取参加 2020 年第五次国民体质监测者；（2）在功率车二级负荷试验前、后各完成一次 baPWV 测量者；（3）同意参加本研究并签署知情同意书者。排除标准：（1）空腹血糖资料缺失者；（2）功率车二级负荷试验数据不完整者。本研究遵循赫尔辛基宣言，研究已获得开滦总医院伦理委员会的批准（［2006］伦理字 5 号）。

1.3 资料收集

1.3.1 流行病学调查内容 流行病学调查包括一般情况、人体测量学指标和生化检测指标。一般情况包括年龄、性别，高血压、高脂血症、降压药史、饮酒史、体育锻炼情况。人体测量学指标包括体质量、BMI、腰围、收缩压（SBP）、舒张压（DBP）。生化检测指标包括空腹血糖、高敏 C 反应蛋白（high-sensitivity C-reactive protein，hs-CRP）、三酰甘油、总胆固醇、高密度脂蛋白胆固醇（high-density lipoprotein cholesterol，HDL-C）、低密度脂蛋白胆固醇（low-density lipoprotein cholesterol，LDL-C）。具体采集方法详见本课题组已发表的文献[23-25]。

1.3.2 相关定义及诊断标准 根据《中国高血压防治指南（2018 年修订版）》[25]：高血压定义为在未使用降压药的情况下，SBP ≥ 140 mmHg 和或 DBP ≥ 90 mmHg（1 mmHg=0.133 kPa），有高血压病史或服用降压药。高脂血症参照《中国成人血脂异常防治指南》[26]，符合下列任何一项即定义为高脂血症：（1）总胆固醇 >5.72 mmol/ L；（2）三酰甘油 >1.70 mmol/ L；（3）HDL-C<0.91 mmol/L；（4）LDL-C>3.64 mmol/L。BMI= 体质量（kg）/ 身高 ^{2}（m^2）；吸烟定义为近一年平均每天至少吸一支烟；饮酒定义为近一年平均每日饮白酒（酒精含量≥ 50%）100 ml，持续时间≥ 1 年；体育锻炼定义为锻炼次数≥ 3 次 / 周，持续时间≥ 30 min/ 次。

1.3.3 空腹血糖检测 受试者于 2020 年 12 月 31 日之前陆续至开滦总医院健康体检中心进行空腹血糖检测，检测前至少空腹 8 h，于体检当日晨起 7：00~9：00 抽取空腹肘静脉血 5 ml，在室温 24℃下，经过 3 000 r/min 离心（离心机半径 13 cm）10 min 后，取上层血清，在 4 h 之内检测空腹血糖。采用己糖激酶法检测，变异系数在 5.6 mmol/L 时不超过 2%，线性上限是 33.3 mmol/L，用日立 7600 型自动生化分析仪进行检测，试剂盒由中生北控生物科技股份公司提供。由专业检验师严格按操作手册进行，随批质量控制。

1.3.4 功率车二级负荷试验 本研究以功率车二级负荷试验作为有氧运动的形式，所有检查均在室温为 22~25℃的现场进行。采用国民体质监测中心统一配套的 GMCS-GLC3 型功率车（天津市星河众邦工程咨询有限公司）进行功率车二级负荷运动试验，研究对象在功率车运动前 12 h 内禁止吸烟、饮酒、摄取咖啡因及剧烈活动。二级负荷试验全程维持 7 min，整个运动过程研究对象始终以 60 转 /min 的转速蹬踏功率车，初始 30 s 为零负荷热身阶段，每 3 min 增加一个负荷等级（25 w），共增 2 次，最后 30 s 为零负荷恢复阶段。

1.3.5 baPWV 相关资料的测量 本测量于功率车二级负荷试验前后各进行 1 次，其中后 1 次检测于试验后立即进行，以反应功率车二级负荷试验作为运动源对人群的即时影响。baPWV 相关资料的测量使用 BP-203RPE Ⅲ网络化动脉硬化检测装置〔欧姆龙健康医疗（中国）有限公司〕，测量项目包括：SBP、DBP、平均动脉压（MAP）、心率（HR）和 baPWV 水平、代谢当量（MET）、最大摄氧量（VO_2max）、峰值心率和功率车二级负荷试验结束至功率车二级负荷试验后测量 baPWV 的时间差（以下简称为 Time），其中峰值心率由佩戴在研究对象右上臂中点内侧的心率仪进行实时监测，VO_2max 由功率车自带系统计算并上传。测量时，研究对象穿薄衣，去枕平卧于测量床上，双手手心置上置于身体两侧，保持安静。医务人员将上臂袖带气囊标志处对准双侧肱动脉，下肢袖带气囊标志位于双侧踝关节内侧，将心电采集装置夹在两侧手腕。对每位研究对象重复测量 2 次，取第 2 次数据为最后结果。本研究取左、右两侧 baPWV 水平中的较大值进行分析。SBP 和 DBP 取右上肢的值进行分析。

功率车二级负荷试验开始前，测量研究对象静息状态下（休息时间≥ 15 min）的 SBP、DBP、MAP、HR 和 baPWV 水平，记作 SBP1、DBP1、MAP1、HR1 和 baPWV1。功率车二级负荷试验结束后，再次测量研究对象 SBP、DBP、MAP、HR 和 baPWV 水平，记作 SBP2、DBP2、MAP2、HR2 和 baPWV2；并计算两次测量的差值，记作△ SBP、△ DBP、△ MAP、△ HR、

△ baPWV；随后记录研究对象的 MET、VO_2max、峰值心率水平和 Time。

1.4 分组方法 根据研究对象的空腹血糖范围四分位数进行分组：Q1 组：<5.00 mmol/L、Q2 组：5.00~<5.40 mmol/L、Q3 组：5.40~<5.81 mmol/L、Q4 组：≥ 5.81 mmol/L。

1.5 统计学方法 数据由各医院经过统一培训的专业人员录入，并由开滦总医院进行汇总并上传 Oracle 数据库。采用 SAS 9.4 软件进行统计分析。符合正态分布的计量资料以（$\bar{x} \pm s$）表示，功率车二级负荷试验前、后的资料采用配对样本 t 检验；多组间比较采用单因素方差分析，用 Scheffe 法进行组间两两多重比较。非正态分布的计量资料以 M（P_{25}，P_{75}）表示，组间比较采用 Kruskal-Wallis H 秩和检验，功率车二级负荷试验前、后的资料比较采用配对秩和检验。计数资料以相对数表示，组间比较采用 χ^2 检验。采用广义线性回归模型评估不同血糖水平对功率车二级负荷试验前、后 baPWV 的影响，以 P<0.05 为差异有统计学意义。

2 结果

被抽样参加第五次国民体质监测的开滦集团职工共 1 200 例，其中参加开滦 2018~2020 年第六次随访体检 1 128 例，排除未在功率车二级负荷试验前、后完成 baPWV 检测 116 例，空腹血糖资料缺失者 86 例，功率车二级负荷试验数据不完整者 2 例，最终纳入本次统计分析的研究对象 924 例，平均年龄为（36.93 ± 7.72）岁。

2.1 研究对象流行病学调查资料比较 各组间流行病学调查资料比较结果显示，Q1 组、Q2 组、Q3 组、Q4 组的年龄、高脂血症、高血压、降压药史、收缩压、舒张压、空腹血糖、Hs-CRP、三酰甘油、总胆固醇、HDL-C、LDL-C 情况比较，差异具有统计学意义（P<0.01）；四组间的饮酒史、吸烟史、体育锻炼、体质量、BMI、腰围情况比较，差异无统计学意义（P>0.05）。组内两两比较结果显示，Q4 组的年龄、高血压、高脂血症、降压药史比例高于 Q1 组、Q2 组、Q3 组，Q3 组的年龄高于 Q1 组（P<0.01）；Q4 组的收缩压、舒张压高于 Q1 组、Q2 组（P<0.01）；Q4 组的 Hs-CRP、总胆固醇、LDL-C 水平和 Q3 组的总胆固醇水平高于 Q1 组、Q2 组（P<0.01），Q2、Q3 组的 Hs-CRP 和 Q3、Q4 组的三酰甘油高于 Q1 组，Q2 组的总胆固醇低于 Q3 组，见表 1。

2.2 研究对象功率车二级负荷试验前、后 baPWV 相关资料比较 各组间功率车二级负荷试验前、后的 baPWV 相关资料比较结果显示，总人群的 HR2 高于 HR1，差异具有统计学意义（P<0.01）；Q1 组、Q2 组、Q3 组 HR2 高于 HR1，差异具有统计学意义（P<0.01）。Q1 组、Q2 组、Q3 组、Q4 组的 baPWV2 高于 baPWV1，差异具有统计学意义（P<0.01）。四组间的 SBP1、SBP2、DBP1、DBP2、MAP1、MAP2、baPWV1、baPWV2 比较，差异具有统计学意义（P<0.01）；组间两两比较结果显示，Q4 组的 DBP2、baPWV1、baPWV2 水平高于 Q1 组、Q2 组、Q3 组，Q4 组的 SBP2、SBP2、DBP1、MAP1、MAP2 水平高于 Q1 组、Q2 组（P<0.01），与 baPWV1 相比，总人群 baPWV2 平均下降 36.0 cm/s。四组间的 △ SBP、△ DBP、△ MAP、HR1、HR2、△ HR、△ baPWV、MET、VO_2max、峰值心率、Time 比较，差异无统计学意义（P>0.05），见表 2。

2.3 不同血糖水平对功率车二级负荷试验前、后 baPWV 水平变化影响的广义线性模型分析结果 以△ baPWV 为因变量（赋值：实测值），以 Q4 组作为对照，以 baPWV1、年龄、BMI、腰围、Hs-CRP、吸烟史、饮酒史、体育锻炼、高血压 + 未使用降压药、高血压 + 使用降压药、高脂血症史、峰值心率、△ HR、△ MAP、Time 作为控制变量，采用广义线性模型进行数据分析。结果显示，在校正混杂因素后，与 Q4 组相比，Q1 组的△ baPWV 水平降低〔b（95%CI）=-18.96（-36.96，-0.96），P=0.04〕，见表 3。

3 讨论

本研究的重要发现是，有氧运动确实能够改善动脉僵硬的程度，但高血糖减弱了有氧运动改善动脉僵硬度的作用，而且这种不利的作用独立于 BMI、高血压等传统心血管病危险因素。既往关于有氧运动对动脉僵硬度影响的研究表明，在健康人群中，有氧运动可以显著改善外周动脉僵硬度[27]。MAGALHÃES 等[28]的一项研究结果显示，有氧运动可以降低糖尿病人群外周动脉僵硬度（carotid distal pulse wave velocity，cdPWV），另一项对 11 例平均年龄为 21 岁的青年健康男性研究显示 30 min 有氧运动后外周动脉僵硬度（Leg pulse wave velocity，LPWV）下降[16]。本研究发现在不同血糖水平青年男性人群（36.93 ± 7.72）岁中，功率车二级负荷试验后即时测得的 baPWV 下降，较静息水平平均下降了 36 cm/s，但 KINGWELL 等[29]的研究结果显示平均年龄为 24 岁的健康男性完成 30 min 功率车负荷运动后的即时动脉僵硬度下降了 80 cm/s，这与本研究结果存在差异，作者推测可能由于这项研究的样本量较小（n=12），导致其有氧运动后的动脉僵硬度下降幅度与本研究相差较大。

本研究中，观察到不同血糖水平人群功率车二级负荷试验后 baPWV 水平下降幅度存在差异。在校正多种混杂因素后，发现与空腹血糖水平最高组（Q4 组）相比，空腹血糖水平最低组（Q1 组）baPWV 多下降了 18.96 cm/s。与本研究结果不同。一项随机交叉试验研究发现有氧运动对高血糖人群（n=24）动脉僵硬度无明显改善[17]，此外，COOKE 等[30]使用了颈股脉搏波传导速

表 1 研究对象流行病学调查资料比较

Table 1 Comparison of epidemiological survey data of the subjects

变量	总人群（N=924）	Q1 组（n=220）	Q2 组（n=240）	Q3 组（n=230）	Q4 组（n=234）	检验统计量值	P 值
一般情况							
年龄（$\bar{x}\pm s$，岁）	36.9±7.7	34.9±7.8	35.4±7.4	37.2±7.2[a]	40.1±7.3[abc]	23.26[e]	<0.01
高脂血症〔n（%）〕	361（39.07）	49（22.27）	85（35.42）	105（45.65）	122（52.14）[abc]	48.39	<0.01
高血压〔n（%）〕	318（34.42）	59（26.82）	62（25.83）	80（34.78）	117（50.00）[abc]	38.65	<0.01
降压药史〔n（%）〕	92（9.96）	11（5.00）	16（6.67）	23（10.00）	42（17.95）[abc]	25.60	<0.01
饮酒史〔n（%）〕	519（56.17）	117（53.18）	126（52.50）	135（58.70）	141（60.26）	4.29	0.23
吸烟史〔n（%）〕	566（61.26）	143（65.00）	146（60.83）	143（62.17）	134（57.26）	2.97	0.40
体育锻炼〔n（%）〕	344（37.23）	84（38.18）	87（36.25）	97（42.17）	76（32.48）	4.85	0.18
人体测量学指标							
体质量（$\bar{x}\pm s$，kg）	76.26±12.32	75.51±11.94	76.05±12.47	76.10±13.08	77.33±11.76	0.90[e]	0.44
BMI（$\bar{x}\pm s$，kg/m^2）	26.29±3.85	25.93±3.80	26.08±3.83	26.31±4.21	26.83±3.50	2.42[e]	0.06
腰围（$\bar{x}\pm s$，cm）	89.66±9.68	89.18±9.46	88.91±9.68	89.36±10.43	91.16±9.02	2.61[e]	0.05
收缩压（$\bar{x}\pm s$，mm Hg）	134.15±13.75	133.02±12.38	131.81±14.93	134.77±13.45	137.00±13.53[ab]	6.42[e]	<0.01
舒张压（$\bar{x}\pm s$，mm Hg）	85.34±11.97	83.65±12.15	83.94±11.82	85.42±12.95	88.29±10.35[ab]	7.45[e]	<0.01
生化检测指标							
空腹血糖〔M（P_{25}，P_{75}），mmol/L〕	5.40（5.00，5.82）	4.74（4.50，4.88）	5.20（5.10，5.30）[a]	5.57（5.50，5.69）[ab]	6.22（5.99，6.59）[abc]	374.54	<0.01
Hs-CRP〔M（P_{25}，P_{75}），mg/L〕	0.24（0.01，1.40）	1.19（0.30，2.60）	0.25（0.01，1.70）[a]	0.16（0.01，1.10）[a]	0.11（0.01，0.36）[ab]	115.97[f]	<0.01
三酰甘油〔M（P_{25}，P_{75}），mmol/L〕	1.23（0.83，1.95）	1.00（0.75，1.59）	1.19（0.80，1.84）	1.32（0.84，2.12）[a]	1.34（1.00，2.13）[a]	23.33[f]	<0.01
总胆固醇（$\bar{x}\pm s$，mmol/L）	4.79±1.10	4.55±0.96	4.64±1.00[c]	4.99±1.32[ab]	4.96±1.03[ab]	9.52[e]	<0.01
HDL-C（$\bar{x}\pm s$，mmol/L）	1.40±0.35	1.45±0.40	1.42±0.37	1.38±0.33	1.35±0.30[a]	4.58[e]	<0.01
LDL-C（$\bar{x}\pm s$，mmol/L）	2.81±0.82	2.68±0.76	2.76±0.71	2.81±0.71	2.98±1.05[ab]	5.22[e]	<0.01

注：按照空腹血糖进行四分位分组，Q1 组表示 <5.00 mmol/L，Q2 组表示 5.00~<5.40 mmol/L，Q3 组表示 5.40~<5.81 mmol/L，Q4 表示 ≥ 5.81 mmol/L；Hs-CRP= 高敏 C 反应蛋白，HDL-C= 高密度脂蛋白胆固醇，LDL-C= 低密度脂蛋白胆固醇；[a] 表示与 Q1 组相比，$P<0.05$；[b] 表示与 Q2 组相比，$P<0.05$；[c] 表示与 Q3 组相比，$P<0.05$；[e] 表示 F 值，[f] 表示 H 值，其余检验统计量表示 χ^2 值；1 mmHg=0.133 kPa。

度（carotid and femoral Pulse Wave Velocity，cfPWV）相关测量指标以观察有氧运动对 2 型糖尿病患者（n=66）与非 2 型糖尿病患者（n=61）动脉僵硬度的即时影响，结果显示与非 2 型糖尿病患者相比，2 型糖尿病患者完成 15 min 竭力运动后即时动脉僵硬度增加 1.6 m/s。cfPWV 主要用于评价中心动脉僵硬度，有关研究表明有氧运动对不同节段动脉僵硬度影响不一致，有氧运动后即时测量的中央动脉段僵硬度相对于静息水平增加，而四肢动脉段的僵硬度会降低[31]，由于上述研究中运动方式更剧烈，样本量相对过小，且使用了 cfPWV 作为动脉僵硬度的测量指标，可能会导致其与本研究结果不一致。

虽然本研究发现不同血糖水平人群功率车二级负荷试验后即时 baPWV 水平下降幅度有差异，且相对较高血糖水平人群，低血糖水平人群下降幅度更为明显，但本研究是观察性研究，无法探究具体机制，根据以往的研究发现，可能的发生机制有：（1）长期处于高血糖状态，导致晚期糖基化终末产物的形成，葡萄糖与动脉内的胶原蛋白形成交联，改变了弹性蛋白和胶原蛋白之间的平衡状态。（2）高血糖导致蛋白激酶 C 的激活，从而导致活性氧的产生和炎症，可能会改变血管壁的结构和功能的完整性[32-33]。（3）由于高血糖水平人群动脉壁固有属性的变化，有氧运动对动脉僵硬度的积极作用弱化，导致有氧运动在不同血糖水平人群作用不一致。此外，考虑到短时间的功率车二级负荷试验仅使血管功能发生了变化，并不能对血管结构造成影响，这也可能导致低血糖水平人群有氧运动后 baPWV 下降幅度相较于高血糖人群更为明显。短时间的有氧运动提高了血流速度，产生了一定剪切应力，诱导了血管内皮细胞释放前列腺素、一氧化氮及其他血管舒张因子，引起血管平滑肌舒张促进血管功能改善，从而达到改善动脉僵硬度的效果[34-36]。而高血糖人群可能伴血管内皮细胞功能障碍、神经系统活性失调等动脉功能受损表现[37]，可能会导致其有氧运动后 baPWV 改善不显著。

改善生活方式和防控多种危险因素仍是心血管病的一级预防措施，各种指南均将有氧运动作为健康生活方式的主要推荐。系统回顾和荟萃分析表明，需要长期有氧运动来降低成年人动脉僵硬度[26]，但本研究结果显示单次的有氧运动后也可以使外周动脉僵硬度下降，相关研究表明单次短时间的有氧运动对 baPWV 影响只是

表 2 研究对象功率车二级负荷试验前、后 baPWV 相关资料的比较

Table 2 Comparison of baPWV-related data before and after the secondary load test of the power vehicle bicycle

变量	总人群（N=924）	Q1 组（n=220）	Q2 组（n=240）	Q3 组（n=230）	Q4 组（n=234）	F（H）值	P 值
SBP1（$\bar{x} \pm s$，mmHg）	131.90 ± 15.36	130.29 ± 14.16	130.45 ± 14.91	132.12 ± 16.03	134.69 ± 15.90[ab]	4.15	<0.01
SBP2（$\bar{x} \pm s$，mmHg）	132.30 ± 14.84	129.74 ± 13.93	131.50 ± 14.81	132.41 ± 14.97	135.44 ± 15.08[ab]	6.01	<0.01
△ SBP〔M（P_{25}，P_{75}），mmHg〕	1（-5，6）	0（-7，6）	1（-4，6）	0（-5，6）	1（-5，7）	4.54[f]	0.21
DBP1（$\bar{x} \pm s$，mmHg）	79.09 ± 11.00	77.32 ± 11.01	77.79 ± 10.76	79.35 ± 11.32	81.82 ± 10.43[ab]	8.04	<0.01
DBP2（$\bar{x} \pm s$，mmHg）	79.38 ± 10.93	77.58 ± 10.83	78.01 ± 10.73	79.40 ± 11.18	82.44 ± 10.39[abc]	9.62	<0.01
△ DBP〔M（P_{25}，P_{75}），mmHg〕	0.40（-3.30，4.15）	0.55（-3.35，4.20）	0.15（-3.50，4.45）	0（-3.30，3.50）	1.00（-3.00，4.80）	1.86[f]	0.60
MAP1（$\bar{x} \pm s$，mmHg）	99.17 ± 12.50	97.23 ± 12.19	98.03 ± 12.24	99.28 ± 13.03	102.04 ± 12.08[ab]	6.66	<0.01
MAP2（$\bar{x} \pm s$，mmHg）	99.44 ± 11.98	97.57 ± 11.14	98.74 ± 12.14	99.39 ± 12.10	101.97 ± 12.10[ab]	5.63	<0.01
△ MAP〔M（P_{25}，P_{75}），mmHg〕	0.30（-4.20，5.10）	0.80（-3.70，5.40）	0.30（-3.80，5.50）	-0.05（-4.70，4.30）	-0.15（-4.50，4.90）	1.70[f]	0.64
HR1（$\bar{x} \pm s$，次 /min）	80.15 ± 12.46	79.49 ± 11.99	78.82 ± 12.32	81.07 ± 12.16	81.24 ± 12.20	2.14	0.09
HR2（$\bar{x} \pm s$，次 /min）	85.62 ± 13.45[e]	85.13 ± 13.19[e]	84.91 ± 14.24[e]	85.29 ± 12.35[e]	87.12 ± 13.89	1.34	0.26
△ HR〔M（P_{25}，P_{75}），次 /min〕	5.00（0，10）	6.00（0，11.00）	5.00（0，11.00）	4.00（-1.00，8.00）	5.00（0，11.00）	5.29[f]	0.15
baPWV1（$\bar{x} \pm s$，cm/s）	1 375.98 ± 209.61	1 351.63 ± 198.92	1 345.50 ± 204.86	1 384.63 ± 216.83	1 421.65 ± 209.58[abc]	6.63	<0.01
baPWV2（$\bar{x} \pm s$，cm/s）	1342.24 ± 208.82[e]	1309.95 ± 194.19[e]	1312.10 ± 208.65[e]	1343.84 ± 203.35[e]	1401.92 ± 215.65[abce]	10.08	<0.01
△ baPWV〔M（P_{25}，P_{75}），cm/s〕	-36.0（-87.0，24.0）	-45.5（-93.0，12.5）	-36.5（-85.0，19.5）	-39.5（-95.0，18.0）	-23.0（-77.0，35.0）	7.51[f]	0.06
MET（$\bar{x} \pm s$）	12.16 ± 2.55	12.42 ± 2.78	12.21 ± 2.26	12.22 ± 2.78	11.79 ± 2.33	2.49	0.06
VO_2max（$\bar{x} \pm s$，ml/kg/min）	42.56 ± 8.91	43.50 ± 9.71	42.73 ± 7.89	42.78 ± 9.74	41.29 ± 8.14	2.49	0.06
峰值心率（$\bar{x} \pm s$，次 /min）	139.35 ± 14.65	139.40 ± 14.90	139.25 ± 15.62	140.14 ± 13.69	138.61 ± 14.33	0.43	0.73
Time（$\bar{x} \pm s$，min）	7.13（4.94，11.16）	7.51（5.41，11.37）	7.38（4.92，12.61）	7.03（5.00，11.15）	6.67（4.73，9.55）	8.22[f]	0.06

注：SBP1= 功率车二级负荷试验前收缩压，DBP1= 功率车二级负荷试验前舒张压，MAP1= 功率车二级负荷试验前平均动脉压，HR1= 功率车二级负荷试验前心率，baPWV1= 功率车二级负荷试验前臂踝脉搏波速度；SBP2= 功率车二级负荷试验后收缩压，MAP2= 功率车二级负荷试验后平均动脉压，HR2= 功率车二级负荷试验后心率；baPWV2= 功率车二级负荷试验后臂踝脉搏波速度；△ baPWV= 试验后与试验前臂踝脉搏波速度的差值，△ SBP= 试验后与试验前收缩压的差值，△ MAP= 试验后与试验前平均动脉压的差值，△ HR= 试验后与试验前心率的差值；MET= 代谢当量；VO_2max= 最大摄氧量；Time 表示峰值心率和功率车二级负荷试验结束至功率车二级负荷试验后测量 baPWV 的时间差；[a] 表示与 Q1 组相比，P<0.05；[b] 表示与 Q2 组相比，P<0.05；[c] 表示与 Q3 组相比，P<0.05；[e] 表示与功率车二级负荷试验前的 baPWV 相关资料相比，P<0.01；[f] 表示 H 值。

表 3 不同血糖水平对功率车二级负荷试验前、后 baPWV 变化影响的广义线性模型分析结果（n=924）

Table 3 Generalized linear model analysis of the effect of fasting blood glucose level on baPWV before and after the secondary load test of the power vehicle bicycle

模型	参数	b（95%CI）	SE	t 值	P 值
模型 1	Q4	—	—	—	—
	Q1	-30.10（-47.39，-12.82）	8.81	6.66	<0.01
	Q2	-22.54（-39.48，-5.60）	8.63	-2.61	0.01
	Q3	-25.38（-42.39，-8.37）	8.67	-2.93	<0.01
模型 2	Q4	—	—	—	—
	Q1	-18.82（-36.69，-0.94）	9.11	-2.07	0.04
	Q2	-12.71（-29.74，4.32）	8.68	-1.47	0.14
	Q3	-19.58（-36.45，-2.71）	8.60	-2.28	0.02
模型 3	Q4	—	—	—	—
	Q1	-18.96（-36.96，-0.96）	9.17	-2.07	0.04
	Q2	-12.37（-29.35，4.60）	8.65	-1.43	0.15
	Q3	-15.23（-31.95，1.49）	8.52	-1.79	0.07

注：模型 1 校正 baPWV1；模型 2 在模型 1 的基础上校正年龄、BMI、腰围、Hs-CRP、吸烟、饮酒、体育锻炼；模型 3 在模型 2 的基础上校正高血压 + 未使用降压药、高血压 + 使用降压药、高脂血症史、峰值心率、△ HR、△ MAP、time；—表示无此项数据。

功能性而不是结构性的改变结果[26]，即这种改变并非是持续性的，之后会恢复基线水平。由于短时间的有氧运动不能提供足够的刺激来促进动脉结构的变化，但如果能增加有氧运动次数（或总时间）有可能使有氧运动对动脉僵硬度的有利作用随着时间的推移而保持，以达到血管结构上的有益改变。同时对于高血糖人群而言，可能需要更积极的运动处方来提供足够的刺激以引发动脉结构变化，以弥补高血糖产生的不利影响。因此，对于临床医务人员，要针对不同人群设计不同的有氧运动方案，以改善动脉硬化延缓血管老化。

综上所述，单次的有氧运动可以改善动脉僵硬度，运动后即时动脉僵硬度下降，而高血糖减弱了有氧运动改善动脉僵硬度的作用。本研究是基于中国北方青年人群的一项大样本量研究，此前较少有关于有氧运动对不同血糖水平人群运动后即时动脉僵硬度的研究。但仍存在一些不足，首先，本研究的人群存在较大的异质性，研究对象均为青年男性，这排除了将该研究结果推广到中年人、老年人或女性个体的可能性。其次，血糖值是基于一次空腹血糖测量来确定的，因此容易对血糖状态

产生一些错误的分组偏差。最后，由于现场条件限制，本研究只能获得功率车二级负荷试验后一个时间点的单次测量结果，且并未对“即时”进行准确的时间界定，这意味着结果推广会有一些局限性，需要更多关于有氧运动后动脉僵硬度重复测量数据，去进一步探究有氧运动对动脉僵硬的改善是否会持续以及持续多久。

作者贡献：何荣负责设计研究方案，选取调查对象，开展调查，数据收集、采集、清洗和统计学分析、绘制图表，撰写论文以及最终版本修订，对论文负责；张丽负责研究调查和数据清洗；张丽、李鹏、张晓玲、张国、臧懿然负责数据收集、采集；吴寿岭负责研究思路和提出研究命题；孙丽霞负责文章的质量控制与审查，对文章整体负责，监督管理。

本文无利益冲突。

参考文献

[1] BULL F C，AL-ANSARI S S，BIDDLE S，et al. World Health Organization 2020 guidelines on physical activity and sedentary behaviour［J］. Br J Sports Med，2020，54（24）：1451-1462. DOI：10.1136/bjsports-2020-102955.

[2] ZHAO D，LIU J，WANG M，et al. Epidemiology of cardiovascular disease in China：current features and implications［J］. Nat Rev Cardiol，2019，16（4）：203-212. DOI：10.1038/s41569-018-0119-4.

[3] THOMPSON P D，ARENA R，RIEBE D，et al. ACSM′s new preparticipation health screening recommendations from ACSM′s guidelines for exercise testing and prescription，ninth edition［J］. Curr Sports Med Rep，2013，12（4）：215-217. DOI：10.1249/JSR.0b013e31829a68cf.

[4] SCHULZE M B，HU F B. Primary prevention of diabetes：what can be done and how much can be prevented?［J］. Annu Rev Public Health，2005，26：445-467. DOI：10.1146/annurev.publhealth.26.021304.144532.

[5] PETERSEN K S，BLANCH N，KEOGH J B，et al. Effect of weight loss on pulse wave velocity：systematic review and meta-analysis［J］. Arterioscler Thromb Vasc Biol，2015，35（1）：243-252. DOI：10.1161/ATVBAHA.114.304798.

[6] BOULÉ N G，HADDAD E，KENNY G P，et al. Effects of exercise on glycemic control and body mass in type 2 diabetes mellitus：a meta-analysis of controlled clinical trials［J］. JAMA，2001，286（10）：1218-1227. DOI：10.1001/jama.286.10.1218.

[7] BALDUCCI S，LEONETTI F，DI MARIO U，et al. Is a long-term aerobic plus resistance training program feasible for and effective on metabolic profiles in type 2 diabetic patients?［J］. Diabetes Care，2004，27（3）：841-842. DOI：10.2337/diacare.27.3.841.

[8] ASHOR A W，LARA J，SIERVO M，et al. Effects of exercise modalities on arterial stiffness and wave reflection：a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials［J］. PLoS One，2014，9（10）：e110034. DOI：10.1371/journal.pone.0110034.

[9] SCHULER G，ADAMS V，GOTO Y. Role of exercise in the prevention of cardiovascular disease：results，mechanisms，and new perspectives［J］. Eur Heart J，2013，34（24）：1790-1799. DOI：10.1093/eurheartj/eht111.

[10] OHKUMA T，NINOMIYA T，TOMIYAMA H，et al. Brachial-ankle pulse wave velocity and the risk prediction of cardiovascular disease：an individual participant data meta-analysis［J］. Hypertension，2017，69（6）：1045-1052. DOI：10.1161/HYPERTENSIONAHA.117.09097.

[11] TANAKA H，DINENNO F A，MONAHAN K D，et al. Aging，habitual exercise，and dynamic arterial compliance［J］. Circulation，2000，102（11）：1270-1275. DOI：10.1161/01.cir.102.11.1270.

[12] MIYACHI M. Effects of resistance training on arterial stiffness：a meta-analysis［J］. Br J Sports Med，2013，47（6）：393-396. DOI：10.1136/bjsports-2012-090488.

[13] MONAHAN K D，TANAKA H，DINENNO F A，et al. Central arterial compliance is associated with age- and habitual exercise-related differences in cardiovagal baroreflex sensitivity［J］. Circulation，2001，104（14）：1627-1632. DOI：10.1161/hc3901.096670.

[14] MONTERO D，ROCHE E，MARTINEZ-RODRIGUEZ A. The impact of aerobic exercise training on arterial stiffness in pre- and hypertensive subjects：a systematic review and meta-analysis［J］. Int J Cardiol，2014，173（3）：361-368. DOI：10.1016/j.ijcard.2014.03.072.

[15] SHIBATA S，FUJIMOTO N，HASTINGS J L，et al. The effect of lifelong exercise frequency on arterial stiffness［J］. J Physiol，2018，596（14）：2783-2795. DOI：10.1113/JP275301.

[16] KOBAYASHI R，YOSHIDA S，OKAMOTO T. Effects of acute aerobic exercise on arterial stiffness before and after glucose ingestion［J］. Int J Sports Med，2017，38（1）：12-18. DOI：10.1055/s-0042-115019.

[17] WAY K L，LEE A S，TWIGG S M，et al. The effect of acute aerobic exercise on central arterial stiffness，wave reflections，and hemodynamics in adults with diabetes：a randomized cross-over design［J］. J Sport Health Sci，2021，10（4）：499-506. DOI：10.1016/j.jshs.2020.02.009.

[18] 韩旭，刘倩，马一涵，等. 非糖尿病人群空腹血糖水平对动脉僵硬度进展的影响［J］. 中华高血压杂志，2021，29（1）：41-47. DOI：10.16439/j.issn.1673-7245.2021.01.010.

[19] FU S H，CHEN W J，LUO L M，et al. Roles of fasting and postprandial blood glucose in the effect of type 2 diabetes on central arterial stiffness：a 5-year prospective community-based analysis［J］. Diabetol Metab Syndr，2017，9：33. DOI：10.1186/s13098-017-0231-3.

[20] SHIN J Y，LEE H R，LEE D C. Increased arterial stiffness in healthy subjects with high-normal glucose levels and in subjects with pre-diabetes［J］. Cardiovasc Diabetol，2011，10：30. DOI：10.1186/1475-2840-10-30.

[21] LOEHR L R，MEYER M L，POON A K，et al. Prediabetes and diabetes are associated with arterial stiffness in older adults：the ARIC study［J］. Am J Hypertens，2016，29（9）：1038-1045. DOI：10.1093/ajh/hpw036.

[22] 体育总局关于开展第五次国民体质监测的通知[EB/OL].(2019-02-02)[2021-08-02]. http://www.gov.cn/xinwen/2019-02/02/content_5363384.htm.

[23] WANG J, LIU L P, ZHOU Y, et al. Increased fasting glucose and the prevalence of arterial stiffness: a cross-sectional study in Chinese adults[J]. Neurol Res, 2014, 36(5): 427-433. DOI: 10.1179/1743132814Y.0000000345.

[24] ZHENG M Y, ZHANG X Y, CHEN S H, et al. Arterial stiffness preceding diabetes: a longitudinal study[J]. Circ Res, 2020, 127(12): 1491-1498. DOI: 10.1161/CIRCRESAHA.120.317950.

[25] 中国高血压防治指南修订委员会, 高血压联盟(中国), 中华医学会心血管病学分会, 等. 中国高血压防治指南(2018年修订版)[J]. 中国心血管杂志, 2019, 24(1): 24-56.

[26] 中国成人血脂异常防治指南制订联合委员会. 中国成人血脂异常防治指南[J]. 中华心血管病杂志, 2007, 35(5): 390-419. DOI: 10.3760/j.issn: 0253-3758.2007.05.003.

[27] SAZ-LARA A, CAVERO-REDONDO I, ÁLVAREZ-BUENO C, et al. The acute effect of exercise on arterial stiffness in healthy subjects: a meta-analysis[J]. J Clin Med, 2021, 10(2): 291. DOI: 10.3390/jcm10020291.

[28] MAGALHÃES J P, MELO X, CORREIA I R, et al. Effects of combined training with different intensities on vascular health in patients with type 2 diabetes: a 1-year randomized controlled trial[J]. Cardiovasc Diabetol, 2019, 18(1): 34. DOI: 10.1186/s12933-019-0840-2.

[29] KINGWELL B A, BERRY K L, CAMERON J D, et al. Arterial compliance increases after moderate-intensity cycling[J]. Am J Physiol, 1997, 273(5): H2186-H2191. DOI: 10.1152/ajpheart.1997.273.5.H2186.

[30] COOKE A B, DASGUPTA K, SPRONCK B, et al. Adults with type 2 diabetes mellitus exhibit a greater exercise-induced increase in arterial stiffness and vessel hemodynamics[J]. Hypertension, 2020, 75(6): 1565-1573. DOI: 10.1161/HYPERTENSIONAHA.120.14778.

[31] MUTTER A F, COOKE A B, SALEH O, et al. A systematic review on the effect of acute aerobic exercise on arterial stiffness reveals a differential response in the upper and lower arterial segments[J]. Hypertens Res, 2017, 40(2): 146-172. DOI: 10.1038/hr.2016.111.

[32] ARONSON D. Cross-linking of glycated collagen in the pathogenesis of arterial and myocardial stiffening of aging and diabetes[J]. J Hypertens, 2003, 21(1): 3-12. DOI: 10.1097/00004872-200301000-00002.

[33] MAZZONE T, CHAIT A, PLUTZKY J. Cardiovascular disease risk in type 2 diabetes mellitus: insights from mechanistic studies[J]. Lancet, 2008, 371(9626): 1800-1809. DOI: 10.1016/S0140-6736(08)60768-0.

[34] HIGASHI Y, YOSHIZUMI M. Exercise and endothelial function: role of endothelium-derived nitric oxide and oxidative stress in healthy subjects and hypertensive patients[J]. Pharmacol Ther, 2004, 102(1): 87-96. DOI: 10.1016/j.pharmthera.2004.02.003.

[35] YANG Z, WANG J M, CHEN L, et al. Acute exercise-induced nitric oxide production contributes to upregulation of circulating endothelial progenitor cells in healthy subjects[J]. J Hum Hypertens, 2007, 21(6): 452-460. DOI: 10.1038/sj.jhh.1002171.

[36] KOZAKOVA M, PALOMBO C. Vascular ageing and aerobic exercise[J]. Int J Environ Res Public Health, 2021, 18(20): 10666. DOI: 10.3390/ijerph182010666.

[37] LACOLLEY P, REGNAULT V, SEGERS P, et al. Vascular smooth muscle cells and arterial stiffening: relevance in development, aging, and disease[J]. Physiol Rev, 2017, 97(4): 1555-1617. DOI: 10.1152/physrev.00003.2017.

(收稿日期：2022-12-19；修回日期：2023-03-16)
(本文编辑：王世越)